

# Zur Phaseninformation des komplexen Reflexionskoeffizienten bei wellenbelasteten Uferböschungen

VON FRITZ BÜSCHING

## 1. Einführung

Das Brandungsgeschehen an steilen Uferböschungen kann insgesamt als eine Kombination der Phänomene von *Reflexion*, *Transmission* und *Dissipation* angesehen werden.

Dieses Ergebnis umfangreicher Modelluntersuchungen im Wellenkanal der FH Bielefeld University of Applied Sciences befindet sich in Analogie zu anderen Wellenarten und insbesondere zu elektromagnetischen Wellen an der Grenzfläche unterschiedlicher Medien [1], [2].

Dementsprechend entsteht im Verlauf des *dissipativen Wellenbrechens* aus der mit der Phasengeschwindigkeit  $c_i$  einfallenden Ursprungswelle der Wellenhöhe  $H_i$  landseitig als *Transmissionswelle* ein Wellenauflaufimpuls mit der Höhe  $H_t < H_i$  und der Fortschrittsgeschwindigkeit  $c_t < c_i$ , während sich gleichzeitig seeseitig eine reflektierte Welle mit der Wellenhöhe  $H_r < H_i$  bildet.

Entscheidend ist dabei, dass die *positive* Wasserspiegelauslenkung der *transmittierten Übertragungswelle* aus Gründen der Impulserhaltung örtlich eine *negative* Wasserspiegelauslenkung der *Reflexionswelle* erfordert.

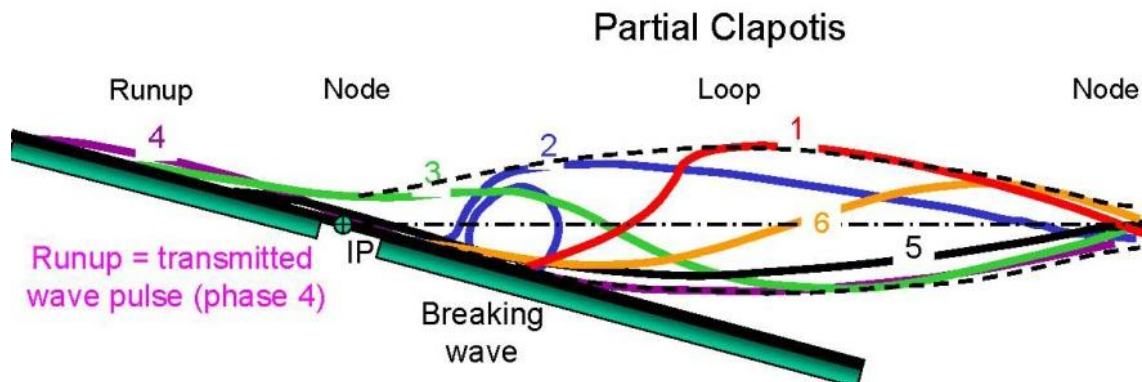


Abb. 1: 6 Phasen eines Sturzbrechers bei einem Phasensprung bedingt durch partielle Reflexion und den transmittierten Auflaufimpuls: In Phase 3 und 4 finden beidseitig des unvollkommenen Clapotis-Knotens, der etwa mit IP zusammenfällt, entgegengesetzte Wasserspiegelauslenkungen statt.

Durch Elimination der Phase 2 würden die Phasen eines Reflexionsbrechers (surging wave) erhalten.

Da sich die *reflektierte* Welle sowohl in der *Höhe* als auch in der *Phase* von der einfallenden Welle unterscheidet, entsteht bei ihrer Überlagerung eine *partiell stehende Welle*, für die nicht nur der Höhenunterschied  $\Delta H$  sondern auch der Phasenunterschied  $\Delta\phi$  (Phasensprung) der beteiligten Wellen kennzeichnend ist.

Somit kann der *Reflexionskoeffizient* – analog seiner Verwendung in der Nachrichtentechnik – als *komplexe Größe*  $\Gamma$  definiert werden mit dem Betrag  $C_r = H_r/H_i =$  dem Quotienten aus den Höhen ( $H$  bzw. Amplituden  $A=H/2$ ) der reflektierten und der einfallenden Welle und dem Phasenunterschied  $\Delta\phi$  beider Wellen.

## 2. Mathematische Vorbetrachtung

Das gesamte Feld einer partial stehenden Welle ergibt sich aus der Überlagerung der *einfallenden* mit der *reflektierten* Welle unter Berücksichtigung eines negativen Vorzeichens für die x-Koordinate bei der letzteren. Für eine mit der Amplitude  $A$  einfallende monochromatische Welle lautet der Ausdruck hierfür in polar komplexer Vektordarstellung:

$$y(x, t) = Ae^{i(\omega t - kx)} + C_r Ae^{i(\omega t + kx + \Delta\phi)} = (e^{-ikx} + C_r e^{i\Delta\phi} e^{ikx}) Ae^{i\omega t} = (e^{-ikx} + \Gamma e^{ikx}) Ae^{i(\omega t)}. \quad (1)$$

Daraus kann die Formel des komplexen Reflexionskoeffizienten  $\Gamma$  bezüglich einer geneigten Wand hergeleitet werden, für die der Schnittpunkt IP der Böschungsneigung mit dem Ruhewasserspiegel (vergl. Abb.1) zugleich mit

$x = 0$  als effektiver Reflexionspunkt festgelegt sei.  $\Gamma$  ist also als der Quotient aus der komplexen reflektierten Welle dividiert durch die komplexe einfallende Welle definiert:

$$\Gamma = C_r e^{i\Delta\varphi} \quad (2)$$

Die Auswertung des Wellenfeldes (Formel (1)) liefert insbesondere die nachfolgenden **Spezialfälle**:

**A. Positive Totalreflexion** für  $\Delta\varphi = 0^\circ$  und  $C_r = 1$ . Dann ist auch  $\Gamma = 1$

$$y(x, t) = (e^{ikx} + e^{-ikx})Ae^{i\omega t} = 2A \cos kx e^{i\omega t} \quad (3)$$

Dies ist die Gleichung einer perfekt stehenden Welle (Clapotis) ohne Phasensprung.

**B. Negative Totalreflexion** für  $\Delta\varphi = 180^\circ$  und  $C_r = 1$ . Dann ist  $\Gamma = -1$

$$y(x, t) = (e^{-ikx} - e^{ikx})Ae^{i\omega t} = -2iA \sin kx e^{i\omega t} \quad (4)$$

Auch dies ist die Gleichung einer perfekt stehenden Welle, jedoch mit einem *Phasensprung* von  $180^\circ$  ( $\pi$ ) zwischen einfallender und reflektierter Welle. Die Funktion dieser Clapotis erscheint also in der  $x$ -Achse um  $L/4$  und in der Phase um  $90^\circ$  gegenüber dem Fall der positiven Totalreflexion versetzt.

Beide Fälle treten bekanntlich *näherungsweise* nicht nur bei der Signalübertragung auf elektrischen Leitungen auf sondern auch bei der Erzeugung stehender *Seilwellen* – je nach der gewählten Randbedingung für das Seilende mit *einwertiger* oder *zweiwertiger* Auflagerung.

Infolge der in der Natur immer gegenwärtigen Reibungseffekte einerseits und ggf. möglicher Transmission andererseits ist in der Realität aber nur mehr oder weniger *unvollkommene Reflexion* möglich, die sich phänomenologisch zwischen den oben angegebenen theoretischen Spezialfällen positiver und negativer Totalreflexion abspielt.

Im Gegensatz zu der in [1] und [2] vorgenommenen Definition des Reflexionskoeffizienten (*sui generis*) als Funktion zweier Veränderlicher, dessen wesentliche Eigenschaft darin besteht, gerade für den Phasenwinkel  $\Delta\varphi = 90^\circ$   $C_r = f(H_r/H_i, \Delta\varphi) = 0$  zu liefern, und im weiteren Unterschied zu der bei Wasserwellen bisher üblichen Verwendung *nur* des Wellenhöhenverhältnisses  $H_r/H_i$ , kann der *komplexe* Reflexionskoeffizient als *vollständiger* Reflexionskoeffizient (Gesamtreflexionskoeffizient) verstanden werden.

### 3. Experimentelle Ermittlung komplexer Reflexionskoeffizienten

Betrag und Phase des komplexen Reflexionskoeffizienten partiell stehender Wellen werden auf der Basis des *experimentell erfassten Feldes* der Wasserspiegelauslenkungen (Einhüllende der Wasserspiegelauslenkungen) seewärts des Schnittpunktes IP ermittelt, den die Bauwerksvorderkante (Böschung) mit dem Ruhewasserspiegel bildet.

Während für den Betrag  $C_r$  die Formel nach Healy (1953) Gültigkeit behält

$$C_r = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \quad \text{mit } H_{\max} = H_i + H_r \text{ und } H_{\min} = H_i - H_r \quad (5)$$

und dazu die maximalen und minimalen Wasserspiegelauslenkungen  $H_{\max}$  und  $H_{\min}$  dem *experimentell erfassten Wellenfeld* entnommen werden können, liefert letzteres auch die erforderlichen Bestimmungsgrößen für die Ermittlung der Phasendifferenz:

Dabei ist bezüglich der Wellenlänge  $L$  zu beachten, dass die Entfernung benachbarter Knoten bzw. benachbarter Schwingungsbäuche jeweils der halben Wellenlänge ( $L/2$ ) entspricht.

Weiterhin ist die Kenntnis der Entfernung  $\eta$  des effektiven Reflexionspunktes von einem (unvollkommenen) Schwingungsbauch (loop) bzw. Schwingungsknoten (node) erforderlich.

Die Phase  $\Delta\varphi$  des komplexen Reflexionskoeffizienten wird dann aus der folgenden Betrachtung erhalten: Für jeden Ort im Abstand  $\eta$  vom Reflexionspunkt beträgt der Phasenabstand, der von der einfallenden Welle bis zum Ort der Reflexion zurückzulegen ist,  $k\eta = 2\pi(\eta/L)$ . Dort tritt bei der Reflexion örtlich die gesuchte Phasenverschiebung  $\Delta\varphi$  auf und daran anschließend für die reflektierte Welle zurück bis zum Ausgangsort wiederum

der Phasenabstand  $k\eta$ . Demnach beträgt der Phasenunterschied zwischen einfallender und reflektierter Welle an diesem Ort  $2k\eta + \Delta\phi$ .

Damit es sich bei dem betrachteten Ort um einen *Schwingungsbauch* der partiellen Clapotis handelt, muss dieser Phasenunterschied einem ganzzahligen Vielfachen von  $2\pi$  ( $360^\circ$ ) gleichen. Somit ergibt sich die Formel

$$\Delta\phi[\eta] = 360(1 - 2\eta_{\max}/L) \quad (6)$$

mit dem Abstand  $\eta_{\max}$  zwischen dem Reflexionspunkt IP und dem bauwerksnahsten *Schwingungsbauch* und der Wellenlänge  $L$ .

Für den Fall, dass es sich bei dem einzumessenden Ort um einen (*unvollkommenen*) *Knoten* handeln soll, muss der betreffende Phasenunterschied einem ungeraden, ganzzahligen Vielfachen von  $\pi$  ( $180^\circ$ ) entsprechen, damit sich einfallende und reflektierte Welle tendenziell auslöschen können. Die analoge Formel lautet dann:

$$\Delta\phi[\eta] = 180(1 - 4\eta_{\min}/L) \quad (7)$$

mit dem Abstand  $\eta_{\min}$  zwischen dem Reflexionspunkt IP und dem bauwerksnahsten *Schwingungsknoten* und der Wellenlänge  $L$ .

Für die Analyse *irregulärer* Wellen (und ihrer Fourier-Komponenten) kann vorteilhaft anstelle des Wellenfeldes der Wasserspiegelauslenkungen (Einhüllende der Wasserspiegelauslenkungen) prinzipiell auf deren *Quadratwerte* Bezug genommen werden. Solche werden bei der *Integration* der (ggf. in Teilfrequenzbänder zerlegten) Energiedichte-Spektren erhalten, wenn diese an jeder Pegelposition die überlagerten vertikalen Wasserspiegelauslenkungen der vom Wellenerzeuger kommenden, der vom Bauwerk reflektierten und ggf. der vom Wellenerzeuger wiederum re-reflektierten Wellen (composite energy spectra) repräsentieren.

Die Methode war unter anderem *insbesondere* bezüglich der Auswirkungen hochenergetischer Beckenschwingungen an einer 1 : 3 geneigten *glatten* Böschung in [1] und [2] eingehend dargestellt worden. Während jedoch dort speziell die Existenz eines *Phasensprungs in der Größenordnung von  $\Delta\phi \approx 180^\circ$*  besonders herausgestellt worden war, wird unten - im Sinne einer *gründlicheren Analyse der Phase des Reflexionskoeffizienten* - nunmehr die Lage der Partialwellen relativ zu IP an einem 1 : 2 geneigte glatten Deckwerk im Vergleich zu einem durchströmbaren *Hohlformkörper-Deckwerk* näher untersucht, vergl. Abb.2.

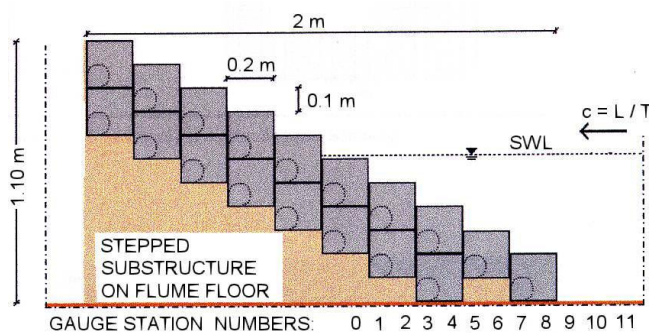


Abb. 2: Querschnitt und Teilansicht eines Böschungsbauwerkes der Neigung 1 : n = 1 : 2 aus 2 Lagen großformatiger Hohlformkörper (HFK) in gestufter Anordnung.

Da der vorliegende Beitrag die Kurzfassung einer umfassenderen Arbeit [3] darstellt, wird bezüglich etwa fehlender Informationen auf die letztere verwiesen.

Beispielhaft sind in Abb. 3 die berechneten Einzelwerte der Energie über der Entfernung von IP aufgetragen und zwar für definierte Teilfrequenzbereiche in der Form gestapelter Flächen im *unteren* Bildteil für die auf der *linken Seite* befindliche *Hohlformkörperböschung* und im *oberen* Bildteil für die *ebene* Vergleichsböschung gleicher Neigung.

Wird das Signalrauschen - hier oberhalb 0,725 Hz - außer Betracht gelassen (obere gelb-orange farbige Flächen), können bei der glatten Böschung alle partiell stehenden Teilwellen (Partialwellen) sehr deutlich durch die Aufeinanderfolge von (unvollkommenen) Bäuchen und Knoten (loops und nodes) identifiziert werden, deren Längen in diesem Falle aus dem doppelten Abstand der Energieminima erhalten werden. Besonders deutlich tritt der „Verschiebungseffekt“ (Selektive Reflexion, [4]) hervor, derart dass die langwelligeren Partialwellen an einer geneigten Ebene *ebener* (d.h., über größerer Wassertiefe) reflektiert werden als die kurzwelligeren: Die bauwerksnahsten unvollkommenen Knoten der Partialwellen sind umso näher IP lokalisiert, je höher ihre mittlere Frequenz ist.

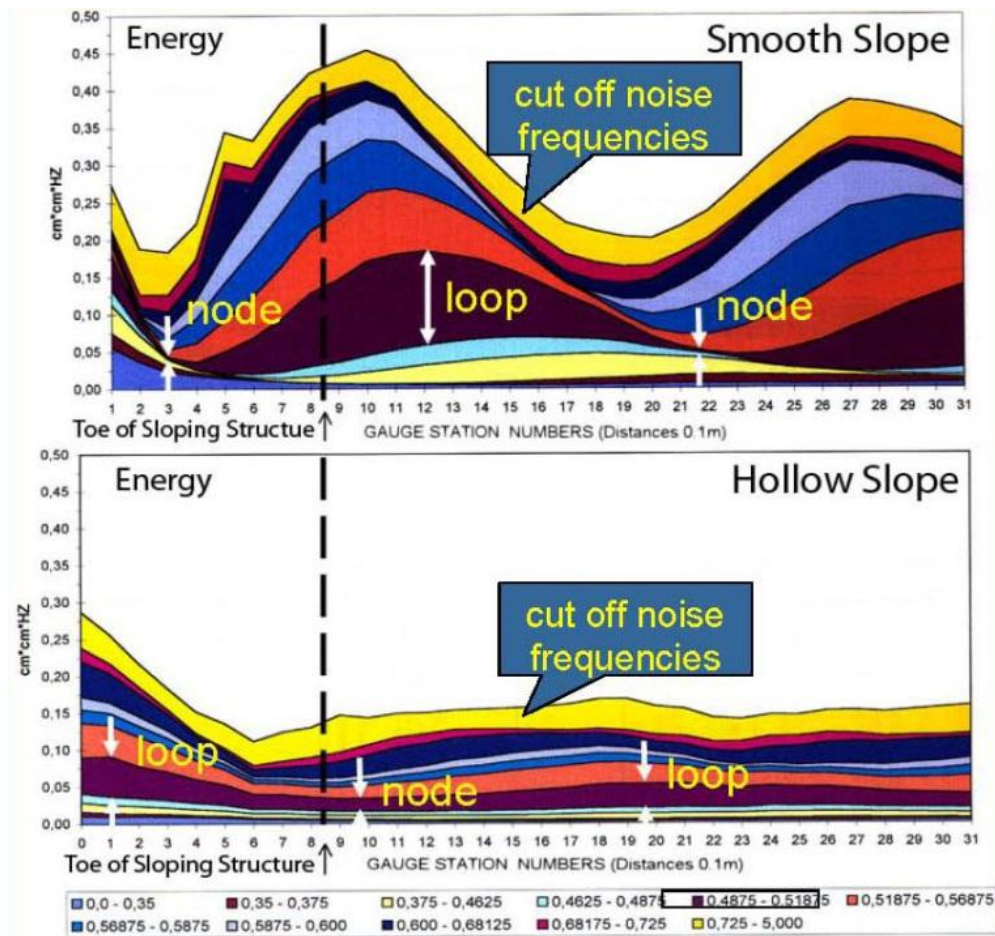


Abb 3: Energiegehalt von 11 Frequenzbändern über der Entfernung von IP.

Oben: Beleg für partiell stehende Wellenkomponenten (Partialwellen) mit ausgeprägten Energiemaxima (loops) und Energieminima (nodes).

Unten: Beleg für Partialwellen mit wesentlich geringerem Energiegehalt.

Deutliche Phasendifferenzen zwischen den Partialwellen gleicher Frequenzbereiche beider Deckwerke.

#### 4. Betrag und Phase komplexer Reflexionskoeffizienten

Für die Bestimmung der Beträge *frequenzgebundener* Reflexionskoeffizienten  $C_{r,i}(f)$  können in der Formel von Healy (1953) - anstelle der darin enthaltenen Summen und Differenzen von Wellenhöhen - die Quadratwurzeln aus den Extremwerten der Energie wie folgt verwendet werden [4]:

$$C_{r,i} = \frac{\sqrt{E_{\max,i}} - \sqrt{E_{\min,i}}}{\sqrt{E_{\max,i}} + \sqrt{E_{\min,i}}} \quad (8)$$

mit:

$E_{\max,i}$  = Betrag des Energiemaximums der zur Partialwelle beitragenden Frequenzkomponenten am Schwingungsbauch  $i$ ,

$E_{\min,i}$  = Betrag des Energieminimums der zur Partialwelle beitragenden Frequenzkomponenten am Schwingungsknoten  $i$ ,

$i$  = Ordnungszahl des Schwingungsbauches bzw. Schwingungsknotens.

Nachfolgend sind die derart ermittelten spektralen Beträge der Reflexionskoeffizienten  $C_r(f)$  für das Glatteckwerk denjenigen des Hohlformkörper-Böschungsbauwerkes in Abb.4 gegenübergestellt.



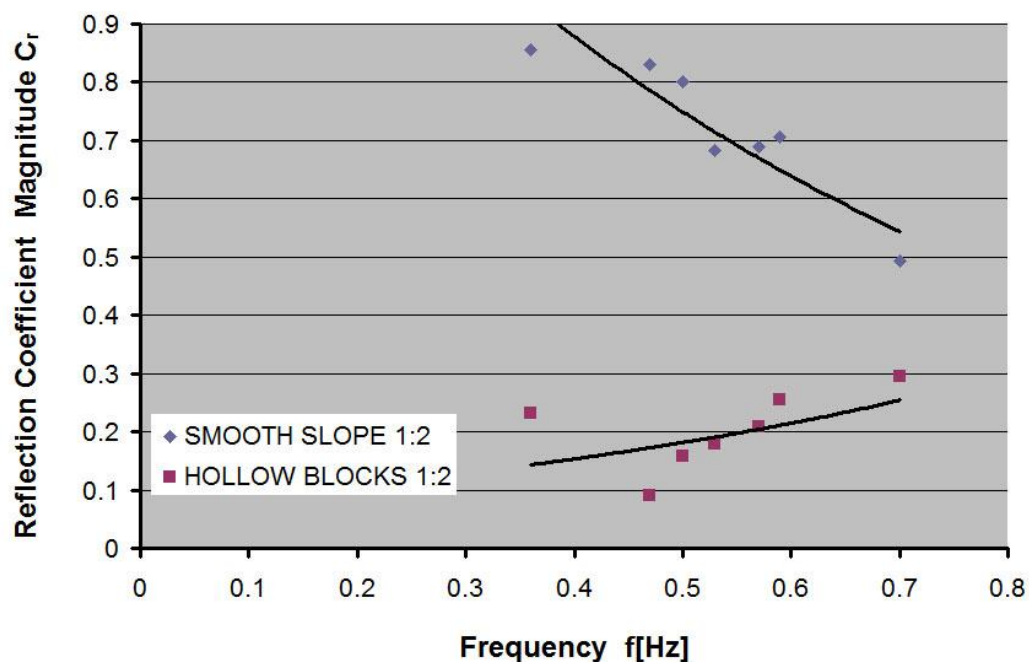


Abb. 4: Bauwerknahe spektrale *Beträge* des Reflexionskoeffizienten  $C_r(f)$  von Partialwellen an Böschungen 1 : n = 1 : 2, aufgetragen über den Mittenfrequenzen der zugehörigen Teilfrequenzbereiche.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind für 5 Partialwellen (des spektralen Kernbereichs) deren *mittlere Frequenzen*, die *Beträge*  $C_r$  des Reflexionskoeffizienten und die aus Abb.3 zu entnehmenden Werte für die zugehörige *Wellenlänge*  $L$  und den Abstand  $\eta_{\max}$  des jeweils bauwerksnahen Schwingungsbauches angegeben. Die daraus unter Verwendung der Formel (6) berechneten Phasenwinkel sowie Realteil und Imaginärteil des Reflexionskoeffizienten sind in den Spalten 7 bis 9 enthalten.

Tab. 1: Berechnung der Phase  $\Delta\varphi$ , des Realteiles  $\text{Re}[\Gamma]$  und des Imaginärteiles  $\text{Im}[\Gamma]$  der Reflexionskoeffizienten für jeweils 5 Partialwellen des *spektralen Kernbereichs* ( $0,47 \leq f \leq 0,59$  Hz) für ein *Glattdeckwerk* bzw. *Hohlformkörper* an Böschungen der Neigung 1 : 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Art	Neigung	Frequenz	Wellenlänge	$\eta$	$C_r$	$\Delta\varphi$	$\text{Re}[\Gamma]$	$\text{Im}[\Gamma]$
		[Hz]	[m]	[m]		[°]		
pos. Totalreflexion	$\infty$				1.00	0.0	1.00	0.00
neg. Totalreflexion	1:n				1.00	180.0	-1.00	0.00
Glattdeckwerk	1:2	0.475	4.40	1.40	0.83	130.9	-0.54	0.63
Glattdeckwerk	1:2	0.503	3.80	1.20	0.80	132.6	-0.54	0.59
Glattdeckwerk	1:2	0.544	3.40	1.00	0.68	148.2	-0.58	0.36
Glattdeckwerk	1:2	0.578	3.00	0.90	0.69	144.0	-0.56	0.41
Glattdeckwerk	1:2	0.594	2.90	0.80	0.70	161.4	-0.66	0.22
Hohlformkörper	1:2	0.475	4.40	2.15	0.09	8.2	0.09	0.01
Hohlformkörper	1:2	0.503	3.80	1.95	0.16	-9.5	0.16	-0.03
Hohlformkörper	1:2	0.544	3.40	1.80	0.18	-21.2	0.17	-0.07
Hohlformkörper	1:2	0.578	3.00	1.65	0.21	-36.0	0.17	-0.12
Hohlformkörper	1:2	0.594	2.90	1.60	0.25	-37.2	0.20	-0.15

Abb.5 stellt das *Zeigerdiagramm* für die Reflexionskoeffizienten der jeweils 5 Partialwellen des spektralen Kernbereichs an den betreffenden Deckwerken der Neigung 1 : 2 dar. Ergänzend sind die theoretischen Fälle der positiven und der negativen Totalreflexion hinzugefügt.

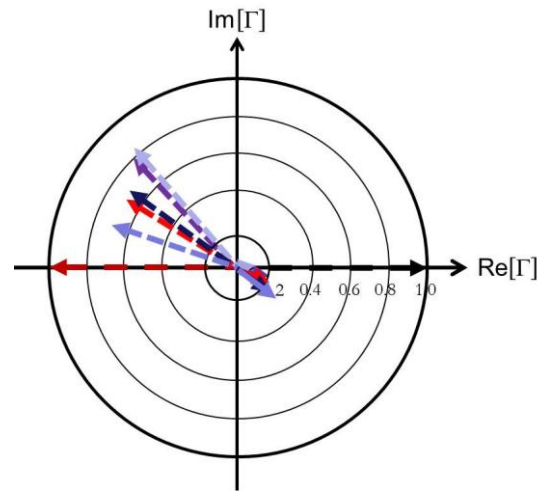


Abb. 5: Zeigerdiagramm für komplexe Reflexionskoeffizienten  $\Gamma = C_r e^{i\Delta\varphi}$  gemäß Tabelle 1.

Demnach drückt sich der eklatante Unterschied beider Böschungskonfigurationen nicht nur in den *Beträgen* aus, sondern ebenfalls *frequenzabhängig* in den betreffenden jeweils etwa  $180^\circ$  abweichenden *Phasenunterschieden* des komplexen Reflexionskoeffizienten.

Nach Untersuchungen von 6 *monochromatischen* Wellen mit Frequenzen im Bereich  $0,45\text{Hz} \leq f \leq 0,85\text{Hz}$  an 3 gleichartigen ebenen Böschungen mit Neigungen im Bereich  $1:3 \leq 1:n \leq 1:1$  [4] kann ein *entgegengesetzter Trend der Beträge und der Phasenwinkel* sowohl bezüglich der Neigungsachse als auch bezüglich der Frequenzachse erkannt werden. Dabei steigen die *Phasenwinkel* mit *fallender* Böschungsneigung und mit *wachsender* Frequenz an, vergl. Abb. 6.

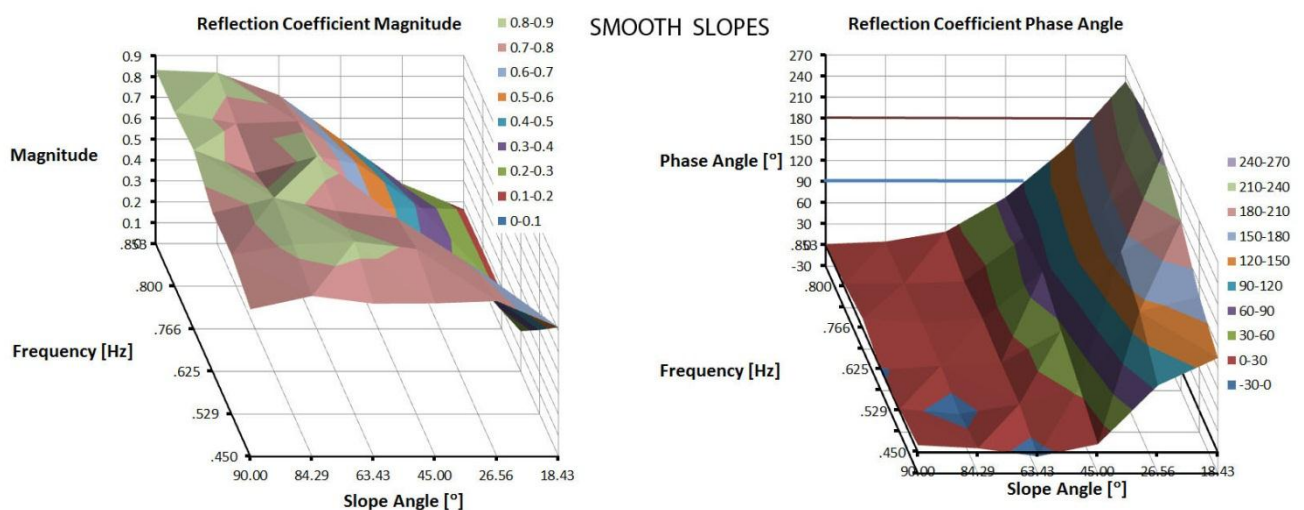


Abb. 6: Betrag (links) und Phase (rechts) komplexer Reflexionskoeffizienten für 6 *Glatteckwerke* mit Böschungswinkeln von  $90^\circ$ ,  $84,29^\circ$ ,  $63,43^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $26,56^\circ$  und  $18,3^\circ$  für monochromatische Wellen des Frequenzbereiches  $0,45\text{Hz} \leq f \leq 0,853\text{Hz}$ .

## 5. Diskussion und Ausblick

Die markante Konsequenz der Definition eines komplexen Reflexionskoeffizienten  $\Gamma$  besteht darin, grundsätzlich in Fälle *positiver* und *negativer* Reflexion zu unterscheiden. Dabei sind die o.a. theoretischen Grenzfälle unterschiedlicher Totalreflexion *begriffsbestimmend*, zumal sich deren physikalische Bedeutung im Hinblick auf das Wellenbrechen aus der *unterschiedlichen Positionierung* der partiellen Clapotis relativ zum Reflexionsort herleitet. So ist dem Fall der *theoretischen Retro-Reflexion* von der *ideal glatten vertikalen Wand ohne Phasensprung* ein weiterer theoretischer Fall der *Reflexion mit einem Phasensprung von  $\Delta\varphi = 180^\circ$*  an die Seite gestellt, dem wohl am ehesten die Randbedingung einer *ideal glatten geneigten Wand* zuzuordnen sein dürfte. Bei der *positiven Totalreflexion* an einer vertikalen Wand liegt damit an dieser infolge der verdoppelten Höhe der einfallenden Welle der (kritische) Fall eines Schwingungsbauches vor. Demgegenüber befindet sich – bei ebenfalls fehlender Transmission – im Falle der *negativen Totalreflexion* am Ort der Reflexion gerade ein Wellenknoten.

Im Hinblick auf die in der Realität nur *partiell* mögliche Reflexion ist aber von besonderer Bedeutung, dass Dissipationseffekte und Transmissionseffekte nur schwer voneinander zu trennen sind, sei es bei den verschiedenen Brecherformen an einer Böschung oder bei der aufgerissenen Clapotis an der vertikalen Wand.

Dennoch ist in [3] auf der Basis visueller Beobachtungen für monochromatische Wellen [4] und der Abb. 6 auch der Versuch einer Zuordnung beobachteter Brecherformen zu Phasenwinkelbereichen unternommen worden.

Dabei konnten derartige Zusammenhänge – unterschiedlich für Glattdackwerke und Hohldeckwerke – sehr wohl festgestellt werden. So war im Gegensatz zu den glatten Böschungen der markante Sturzbrecher an den Hohldeckwerken *gar nicht* zu beobachten.

Es sei hier aber festgestellt, dass – wegen der zu geringen Stichprobe von Wertepaaren für Betrag und Phase vorliegender komplexer Reflexionskoeffizienten – zurzeit *keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen* zur Abhängigkeit der Brecherform von der Art der Reflexion gezogen werden können.

Andererseits kann aber erwartet werden, dass solche Schlussfolgerungen künftig aus *zielgerichteten systematischen Untersuchungen* mit einer korrespondierenden Betrachtung von Betrag und Phase bzw. Realteil  $\text{Re}[\Gamma]$  und Imaginärteil  $\text{Im}[\Gamma]$  dezidiert hervorgehen werden, als dies bisher nur unter der alleinigen Verwendung des Betrages des Reflexionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Irribarrenzahl geschieht. Insbesondere sollte sich die Natur der *hohen Streuung* in den beispielsweise von Van der Meer (1988) ermittelten Beträgen  $C_r$  des Reflexionskoeffizienten für Irribarrenzahlen  $3 \leq \xi \leq 9$  unter *Einbeziehung der korrespondierenden Phasenwerte* weiter aufklären lassen.

Die Verwendbarkeit komplexer Reflexionskoeffizienten stellt ein weiteres Beispiel dafür dar, dass von elektromagnetischen (und anderen) Wellen bekannte Phänomene auch für Wasserwellen Bedeutung haben können.

Bei der Behandlung der Grenzflächenphänomene wellenbelasteter Bauwerke könnte deshalb eine ganzheitliche Betrachtung von Nutzen sein, die die *korrespondierende* Formulierung *komplexer* Koeffizienten für Reflexion, Transmission und Absorption in Betracht zieht.

## 6. Schriftenverzeichnis

- [1] BÜSCHING, F.: Phasensprung bei der partiellen Reflexion irregulärer Wasserwellen an steilen Uferböschungen, 1. HANSA – INTERNATIONAL MARITIME JOURNAL - C 3503 E, 147, H.5 P.87-98, 2010 (FEHLERHAFTER DRUCK). 2. BINNENSCHIFFFAHRT - C 4397 D, 65, H.9 P.73-77 & H.10 P.64-69, 2010.
- [2] BÜSCHING, F.: Phase Jump due to Partial Reflection of Irregular Water Waves at Steep Slopes, 1. COASTLAB 10, BARCELONA, SPAIN, 28TH-30TH SEPTEMBER, 1ST OCTOBER 2010, PAPER NO. 67, P.1-9. 2. POWERPOINT PRESENTATION, URN:NBN:DE:0066-201011165 [http://hydromech.de/Veroeff/phase\\_jump\\_20101116.pdf](http://hydromech.de/Veroeff/phase_jump_20101116.pdf), 25 SLIDES
- [3] BÜSCHING, F.: Komplexe Reflexionskoeffizienten für Wasserwellen – Zur Klassifizierung von Brandungseffekten an Küstenschutzbauwerken, Die Küste, Heft 79, 2012, im Druck.
- [4] BÜSCHING, F.: Hollow Revetment Elements, 1. Proc. Fourth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries COPEDEC IV, Rio de Janeiro, S. 961-976, 1995 2. Beiträge aus dem Küsteningenieurwesen (Papers on Coastal Engineering), FH Bielefeld, Abt. Minden, Nr. 4, 1996

## 7. Abstract

Based on model investigations specific phenomena of waves breaking on rather steep slopes (1:2 and 1:3) are traced back partly to varying phase shifts  $\Delta\varphi$ , occurring between incident and reflected waves.

As an analogue of electromagnetic waves at uniform planar interfaces, the process of wave breaking is looked upon as combined effects resulting from reflection, transmission and dissipation.

Accordingly a complex reflection coefficient  $\Gamma$  is defined comprising of the magnitude  $C_r = H_r/H_i$  and the phase  $\Delta\varphi$ .

Results are presented for irregular waves by magnitudes and phases in the Gaussian plane and for monochromatic waves with respect to some frequencies and slope angles.

---

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching

Hydromech

Dießelhorststr. 1, 38116 Braunschweig

Tel. +49 (0)531/2512004

E-Mail: [buesching@hollow-cubes.de](mailto:buesching@hollow-cubes.de)

<http://www.hollow-cubes.de>